Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit

Bringt man einen zylindrischen Supraleiter, z. B. Blei oder Zinn, oberhalb seines Sprungpunktes in ein senkrecht zu seiner Achse gerichtetes homogenes Magnetfeld, so gehen die Kraftlinien wegen der sehr geringen Suszeptibilität de Supraleiter (Zinn ist schwach paramagnetisch, Blei diamagnetisch) fast ungehindert durch sie hindurch. Nach den bisherigen Anschauungen war zu erwarten, dass die Kraftlinienverteilung unverändert bleibt, wenn man die Temperatur, ohne an dem äußeren Magnetfeld etwas zu ändern, bis unter den Sprungpunkt erniedrigt. Unsere Versuche an Zinn und Blei haben im Gegensatz hierzu folgendes ergeben:

I. Beim Untersehreiten des Sprungpunktes ändert sich die Kraftlinienverteilung in der äußeren Umgebung des Supraleiters und wird nahezu so, wie es bei der Permeabilität, also der diamagnetischen Suszeptibilität 12, des Supraleiters zu erwarten wäre.

II. Im Inneren eines langen Bleiröhrchens bleibt -- trotz der dem I. Effekt entsprechenden Änderung des Magnetfeldes in der äußeren Umgebung -- beim Unterschreiten des Sprungpunktes das oberhalb desselben vorhandenen Magnetfeldes im mittleren Teil des Rohres nahezu bestehen.

Es wurden 2 verschiedene Versuchsanordnungen benutzt: Bei der ersten wurden zwei parallele zylindrische Supraleiter von etwa 140 mm Länge, 3 mm Stärke und 1,5 mm Abstand verwendet. Zwischen ihnen befand sich eine Spule von etwa 10 mm Länge, die parallel zur Achse der Supraleiter drehbar und mit einem ballistischen Galvanometer verbunden war, so dass der Induktionsfluss durch sie ermittelt werden konnte. Es ergab sich bei zwei Einkristallen aus Zinn, wie schon auf der Würzburger Physikertagung berichtet wurde, für das Verhältnis des Induktionsflusses unterhalb und oberhalb des Sprungpunktes der Wert 1.70, für zwei polykristalline Bleizylinder nach weiteren, inzwischen angestellten Messungen der Wert 1.77. Die Feldstärke betrug hierbei etwa 5 Gauß. Nach der Maxwellsehen Theorie für den vollkommenen Leiter ergibt sich mit Hilfe von Formeln, die sich aus Rechnungen von v. LAUE und MÖGLICH[1] ableiten lassen, mit dem Wert o der Permeabilität in beiden Fällen der Wert 1.77. Die Abweichungen liegen wegen der nicht genau bekannten räumlichen Verteilung der Spulenwindungen und beim Zinn auch wegen der nicht genau kreiszylindrischen Form der Einkristalle innerhalb der möglichen Fehler.

Bei der zweiten Versuchsanordnung wurde ein zylindrisches Bleiröhrchen von etwa 130 mm Länge, 3 mm Außen und 2 mm Innendurchmesser verwendet. Die mit dem ballistischen Galvanometer verbundene Spule war wieder parallel zur Achse des Bleiröhrchens drehbar und konnte im Inneren und neben dem Bleiröhrchen angebracht werden. Im Inneren stieg der Magnetfeldfluss durch die Spule beim Unterschreiten des Sprungpunktes um etwa 5 % an. Die

Feldstärke im Außenraum betrug hierbei wieder etwa 5 Ganß. Ob das Feld im Inneren homogen blieb, konnte nicht festgestellt werden, da die Spule den inneren Querschnitt nahezu völlig ausfüllte. Außerhalb des Bleiröhrchens war der Feldverlauf nach Unterschreiten des Sprungpunktes wieder etwa so, wie er bei der Permeabilität o des Supraleiters zu erwarten ist.

Beim Aussehalten des äußeren Feldes im supraleitenden Zustand des Bleis blieb das Feld im Inneren des Bleiröhrchens unverändert bestehen. Die Feldstärke in der äußeren Umgebung wurde nicht völlig Null. Zum Beispiel blieb an der Stelle der Bleioberfläche, wo im nichtsupraleitenden Zustand das Feld normal zu ihr stand, bei verschiedenen Messreihen eine Feldstärke von 5--15 % derjenigen des äußeren Feldes bestehen.

Beim Aussehalten des äußeren Feldes im supraleitenden Zustand des Bleis blieb das Feld im Inneren des Bleiröhrchens unverändert bestehen. Die Feldstärke in der äußeren Umgebung wurde nicht völlig Null. Zum Beispiel blieb an der Stelle der Bleioberfläche, wo im nichtsupraleitenden Zustand das Feld normal zu ihr stand, bei verschiedenen Messreihen eine Feldstärke von 5--15 % derjenigen des äußeren Feldes bestehen.

Wurde das äußre Feld nach Eintritt der Supraleitfähigkeit eingeschaltet, so blieb die Feldstärke im Inneren des Bleiröhrchens, wie schon nach den bisherigen Anschauungen zu erwarten war, Null. Der Kraftlinienverlauf in der äußeren Umgebung entsprach wieder etwa dem bei der Permeabilität o des Supraleiters zu Erwartenden.

Die Darstellung des Befundes durch Angabe der Änderung der makroskopisch definierten Permeabilität stößt vielleicht für die Vorgänge im Inneren des Bleiröhrchens auf Schwierigkeiten, da möglicherweise kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Induktion und Feldstärke mehr besteht. Stattdessen kann man offenbar, tiefer gehend, die Ergebnisse darzustellen suchen durch Angabe von mikroskopischen oder makroskopischen Strömen in den Supraleitern unter Annahme der Permeabilität X an den stromfreien Stellen. Diese Ströme ändern sich offenbar spontan oder treten spontan neu auf beim Eintritt der Supraleitfähigkeit entsprechend dem neuen Effekt.

Mit dem neuen Effekt hängen folgende weitere experimentelle Befunde zusammen, die hier nur kurz erwähnt werden können:

Sind die parallelen Supraleiter durch eine an einem Ende angebrachte Verbindung hintereinandergeschaltet und wird durch sie von außen ein oberhalb der Sprungtemperatur eingeschalteter Strom hindurchgeschickt, so wird der Magnetfeldfluss zwischen den Supraleitern beim Unterschreiten des Sprungpunktes ohne Änderung des äußeren Stromes grösser. Wird die Sprungkurve an Zinneinkristallen bei niemals unterbrochenem äußerem Strom aufgenommen, so treten auch ohne äußeres Magnetfeld Hysteresis Erscheinungen auf, indem die Sprungpunkte beim Steigen und Sinken der Temperatur nicht zusammenfallen.

Schließlich sei noch auf die Analogie zum Ferromagnetismus hingewiesen, den scholl früher GERLACH[2] in Parallele zur Supraleitfähigkeit gestellt hatte.

Berlin, Physikalisch-Technische Reichsallstalt, den 16. Oktober 1933. W. MEISSNER. R. OCHSENFELD.

1 Berl. Ber. i6, 544 (1933).

2 Metallwirtsehaft 9, 1006 (1930).

Se um supercondutor cilíndrico, por exemplo, chumbo ou estanho, é levado a um campo magnético homogêneo perpendicular a seu eixo acima de seu ponto de transição, as linhas de força passam por ele quase sem obstáculos devido à baixíssima suscetibilidade dos supercondutores (o estanho é fracamente paramagnético, diamagnético de chumbo). De acordo com as opiniões anteriores, era de se esperar que a distribuição das linhas de força permanecesse inalterada se a temperatura baixasse para abaixo do ponto de transição sem mudar nada no campo magnético externo. Nossas experiências sobre estanho e chumbo, pelo contrário, mostraram o seguinte:

I. Quando a temperatura é baixada abaixo do ponto de salto, a distribuição da linha de força no ambiente externo do supercondutor muda e torna-se quase como seria de se esperar para a permeabilidade, ou seja, a suscetibilidade diamagnética 12, do supercondutor.

II. Dentro de um longo tubo de chumbo - apesar da mudança do campo magnético no ambiente externo correspondente ao efeito I. - quando o campo magnético na parte central do tubo cai abaixo do ponto de salto, o campo magnético existente acima dele quase persiste.

Dois arranjos experimentais diferentes foram usados: No primeiro, foram usados dois supercondutores cilíndricos paralelos de cerca de 140 mm de comprimento, 3 mm de espessura e 1,5 mm de distância. Entre eles havia uma bobina de cerca de 10 mm de comprimento, giratória, paralela ao eixo dos supercondutores e conectada a um galvanômetro balístico, para que o fluxo de indução através dele pudesse ser determinado. Como já informado na conferência dos físicos de Würzburg, a relação do fluxo de indução abaixo e acima do ponto de transição foi de 1,70 para dois cristais simples de estanho, e 1,77 para dois cilindros de chumbo policristalino, de acordo com outras medidas feitas nesse meio tempo. A força do campo aqui era de cerca de 5 Gauss. Segundo a teoria de Maxwell para o condutor perfeito, com a ajuda de fórmulas derivadas de cálculos do v. LAUE e MÖGLICH[1], o valor o da permeabilidade em ambos os casos é 1,77. Os desvios estão dentro dos possíveis erros devido à distribuição espacial das voltas da bobina, que não é exatamente conhecida, e no caso de estanho também devido à forma não exatamente circular-cilíndrica dos monocristais.

Na segunda instalação experimental, foi usado um tubo cilíndrico de chumbo de cerca de 130 mm de comprimento, 3 mm de diâmetro externo e 2 mm de diâmetro interno. A bobina conectada ao galvanômetro balístico era novamente giratória paralela ao eixo do tubo de chumbo e podia ser colocada dentro e ao lado do tubo de chumbo. No interior, o fluxo do campo magnético através da bobina aumentou em cerca de 5% ao cair abaixo do ponto de salto. O

A força do campo no espaço exterior era novamente de cerca de 5 Gauss. Não foi possível determinar se o campo permaneceu homogêneo por dentro, já que a bobina encheu quase completamente a seção transversal interna. Fora do tubo de chumbo, a variação do campo depois de cair abaixo do ponto de transição foi novamente mais ou menos a mesma que se esperava para a permeabilidade do supercondutor.

Quando o campo externo foi mantido fora do estado supercondutor do chumbo, o campo dentro do tubo de chumbo permaneceu inalterado. A força do campo no ambiente externo não se tornou completamente zero. Por exemplo, no ponto na superfície do chumbo onde o campo era normal para ele no estado não-supercondutor, uma força de campo de 5--15% da do campo externo persistiu em várias séries de medidas.

Quando o campo externo foi mantido fora do estado supercondutor do chumbo, o campo dentro do tubo de chumbo permaneceu inalterado. A força do campo no ambiente externo não se tornou completamente zero. Por exemplo, no ponto na superfície do chumbo onde o campo era normal para ele no estado não-supercondutor, uma força de campo de 5--15% da do campo externo persistiu em várias séries de medidas.

Se o campo externo fosse ligado após o início da supercondutividade, a força do campo dentro do tubo de chumbo permaneceria zero, como já era de se esperar de acordo com as visões anteriores. A linha de força no ambiente externo correspondeu novamente aproximadamente àquela esperada com a permeabilidade o do supercondutor.

A representação da descoberta indicando a mudança na permeabilidade macroscopicamente definida talvez encontre dificuldades para os processos dentro do tubo de chumbo, já que pode não haver mais uma conexão clara entre a indução e a força de campo. Ao invés disso, pode-se aparentemente tentar representar os resultados com mais detalhes especificando correntes microscópicas ou macroscópicas nos supercondutores, assumindo a permeabilidade X nos pontos livres de corrente. Estas correntes obviamente mudam espontaneamente ou parecem espontaneamente novas no início da supercondutividade de acordo com o novo efeito.

Relacionadas com o novo efeito estão as seguintes descobertas experimentais adicionais, que só podem ser brevemente mencionadas aqui:

Se os supercondutores paralelos são conectados em série por uma junção ligada em uma extremidade, e se uma corrente ligada acima da temperatura de transição é passada através deles do exterior, o fluxo do campo magnético entre os supercondutores torna-se maior quando a temperatura cai abaixo do ponto de transição sem qualquer mudança na corrente externa. Se a curva de salto é registrada em cristais individuais de estanho com corrente externa nunca interrompida, ocorrem fenômenos de histerese mesmo sem campo magnético externo, na medida em que os pontos de salto não coincidem quando a temperatura sobe e desce.

Relacionadas com o novo efeito estão as seguintes descobertas experimentais adicionais, que só podem ser brevemente mencionadas aqui:

Se os supercondutores paralelos são conectados em série por uma junção ligada em uma extremidade, e se uma corrente ligada acima da temperatura de transição é passada através deles do exterior, o fluxo do campo magnético entre os supercondutores torna-se maior quando a temperatura cai abaixo do ponto de transição sem qualquer mudança na corrente externa. Se a curva de salto é registrada em cristais individuais de estanho com corrente externa nunca interrompida, ocorrem fenômenos de histerese mesmo sem campo magnético externo, na medida em que os pontos de salto não coincidem quando a temperatura sobe e desce.

Finalmente, a analogia com o ferromagnetismo, que GERLACH[2] havia colocado anteriormente em paralelo com a supercondutividade, deve ser apontada.

Berlim, Physikalisch-Technische Reichsallstalt, 16 de outubro, x933. W. MEISSNER. R. OCHSENFELD.

1 Berl. Ber. i6, 544 (1933).

2 Metallwirtsehaft 9, 1006 (1930).